



Научная статья



УДК 624.131.37:622.257.1

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-40-48

Комплексный подход в изучении тампонажа гидроактивизированных грунтов оснований фундаментов



П.Н. Должиков  ✉, **В.М. Талалаева** 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ dolpn@yandex.ru

Аннотация

Введение. Широкомасштабное закрытие угольных шахт методом «мокрой» консервации привело к необратимым изменениям в подработанном породном массиве. Прежде всего, произошли подъем уровня шахтных вод и гидроактивизация грунтов оснований фундаментов зданий, что вызвало новые геодинамические эффекты и аварийные деформации зданий. Поэтому необходимо выполнение реконструкции оснований фундаментов зданий на подработанных территориях. Перспективным направлением тампонажа грунтов для этих условий является высоконапорная инъекция вязкопластичных растворов в режиме гидрорасчленения. Цель работы — исследование параметров тампонажа и степени упрочнения гидроактивизированных грунтов на подработанных территориях.

Материалы и методы. Выполнение исследований проводилось на натурных образцах горных пород и с использованием их физико-механических и деформационно-прочностных свойств. Комплексный подход к исследованиям предусматривал изучение инженерно-геологических условий, технологических параметров тампонажа пород и качества закрепления и водоизоляции гидроактивизированных грунтов.

Результаты исследования. В соответствии с комплексной методикой исследований на первом этапе был выполнен инженерно-геологический и горнотехнический анализ подработанных площадей и обоснована геоструктурная типизация территорий Шахтинско-Несветаевского района в зависимости от мощности покровных отложений.

На втором этапе аналитически установлены параметры формирования тампонажной подушки на контакте с коренными породами. А для дисперсных разуплотненных пород эмпирио-аналитически установлены закономерности и степень фильтрационной консолидации путем инъекции вязкопластичного раствора. Методом компьютерного и физического моделирования для трех геоструктурных типов получены закономерности деформирования грунтов оснований до и после тампонажа.

На третьем этапе проведены натурные исследования параметров и качества тампонажа при реконструкции оснований фундаментов двух зданий в г. Шахты. Доказано, что тампонаж гидроактивизированных грунтов увеличивает их прочность до 0,4 МПа и снижает деформации основания в 2–2,5 раза.

Обсуждение и заключение. Применение комплексной методики в изучении тампонажа гидроактивизированных грунтов на подработанных территориях позволило обосновать технологические схемы и параметры упрочнения и гидроизоляции дисперсных и скальных трещиноватых пород. По результатам аналитических, компьютерных, лабораторных и натурных исследований установлены закономерности и степень изменения деформационно-прочностных свойств гидроактивизированных грунтов основания после тампонажа вязкопластичными растворами.

Ключевые слова: инженерная геология, типизация условий, технологические схемы, тампонаж, параметры, грунты основания, гидроактивизация, стабилизационная подушка, деформирование, прочность

Для цитирования. Должиков П.Н., Талалаева В.М. Комплексный подход в изучении тампонажа гидроактивизированных грунтов оснований фундаментов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(3):40–48. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-40-48

Original article

Study of Grouting in the Hydraulically Activated Subfoundation Soils Using the Comprehensive Approach

Petr N. Dolzhikov ✉, **Viktoria M. Talalaeva**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉dolpn@yandex.ru

Abstract

Introduction. The large-scale "wet" closure of collieries had led to irreversible changes in the underworked rock mass. First of all, there took place the mine-water level rise and hydraulic activation of buildings' subfoundation soils, which induced the new geodynamic effects and hazardous deformations of buildings. Therefore, it is necessary to carry out the reconstruction of buildings' subfoundations on the underworked territories. Under these circumstances, the high-pressure jet grouting with viscoplastic grouts using the hydraulic fracturing is considered a highly-promising trend of soil grouting. The work aims at studying the parameters of grouting and the degree of consolidation of hydraulically activated soils on the underworked territories.

Materials and Methods. The research was carried out with the rock full scale specimens, taking into account their physical-mechanical and strain-strength properties. The comprehensive approach to research implied studying the geotechnical conditions and the technological parameters of rock grouting along with the quality of stabilisation and waterproofing of hydraulically activated soils.

Results. In accordance with the comprehensive research methodology, at the first stage, the geotechnical and mining-engineering analysis of the underworked territories were carried out and the geostructural typification of the Shakhtinsk-Nesvetaevsky district territories was substantiated depending on the thickness of the covering deposits.

At the second stage, the grout pad formation parameters at contact with the parent rocks were analytically determined. Moreover, for dispersive decompacted rocks the consistent patterns and the degree of filtration consolidation were established in the empirically-analytical way by viscoplastic grout injection. Using the computer and physical modeling method, the consistent patterns of subfoundation soils deformation before and after grouting were obtained for three geostructural types.

At the third stage, the field studies of the grouting parameters and quality were carried out during the subfoundations reconstruction of two buildings in the city of Shakhty. It was proved that grouting in the hydraulically activated soils increases their strength up to 0.4 MPa and reduces subfoundations deformation by 2–2.5 times.

Discussion and Conclusions. Application of the comprehensive methodology to the study of grouting in the hydraulically activated soils of the underworked territories made it possible to substantiate the process flow schemes and parameters of consolidation and waterproofing of dispersive and fractured hard rocks. Based on the analytical, computer, laboratory and field study results, the consistent patterns and the degree of variation in the deformation-strength properties of the hydraulically activated subfoundation soils after viscoplastic grouting were established.

Keywords: geotechnical engineering, typification of conditions, process flow schemes, grouting, parameters, subfoundation soils, hydraulic activation, stabilisation pad, deformation, strength

For citation. Dolzhikov PN, Talalaeva VM. Study of Grouting in the Hydraulically Activated Subfoundation Soils Using the Comprehensive Approach. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(3):40–48. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-40-48

Введение. Территории шахтерских городов и поселков за последние десятилетия испытывают геомеханические, гидрогеологические и экологические преобразования в результате массового закрытия горных предприятий методом «мокрой» консервации. Результатом этого стали негативные процессы — вертикальные деформации, проявляющиеся в виде подтоплений, просадок и провалов земной поверхности. Из-за резкого подъема шахтных вод произошли комплексные изменения в системе «здание — грунтовый массив — урбанизированная среда». Свойства грунтов оснований фундаментов перешли в новую стадию деформирования в связи с их гидроактивизацией. В гидроактивизированном породном массиве проявляются новые геомеханические эффекты, приводящие здания в аварийное состояние [1–5].

Наиболее остро эта проблема развивается в Шахтинском угольном районе, где основная часть зданий находится под влиянием подработки породного массива. Поэтому весьма актуально изучение и применение методов реконструкции оснований фундаментов, представленных гидроактивизированными подработанными породами [4, 6, 9].

Практика строительства показывает, что сегодня одним из перспективных направлений усиления и гидроизоляции основания фундаментов является использование эффективного метода тампонажа вязкопластичным раствором в режиме гидроразрыва грунта [8–11]. Однако для названных геологических и горнотехнических условий данная технология требует адаптации и дифференциации путем установления новых закономерностей процесса тампонажа и применения эффективных ресурсосберегающих растворов. Поэтому целью исследований было изучение технологических схем, параметров тампонажа и степени упрочнения гидроактивизированных грунтов оснований фундаментов на подработанных территориях.

Материалы и методы. Поскольку применение метода тампонажа горных пород с целью их упрочнения и гидроизоляции определяется инженерно-геологическими и горнотехническими условиями, последние были доминирующим фактором при составлении методики исследований. Во-вторых, важное значение имеют технологические параметры инъекционного процесса, обеспечивающие качество работ. В-третьих, необходимо исследование изменение деформационно-прочностных параметров основания. Поэтому для всестороннего изучения процесса тампонажа гидроактивизированных грунтов оснований фундаментов применялась комплексная методика:

– анализ геологической и горнотехнической документации по подработанным и гидроактивизированным территориям;

– аналитические исследования процесса тампонирования дисперсных и скальных трещиноватых пород;

– компьютерное моделирование деформирования затампонированных горных пород для типовых горно-геологических условий;

– экспериментальные исследования фильтрационной консолидации разуплотненных горных пород вязкопластичным раствором;

– натурные исследования процесса тампонажа гидроактивизированных горных пород и повышения их прочности.

При проведении лабораторных испытаний свойств горных пород использовались образцы естественных пород ненарушенного сложения. Для выполнения физического моделирования применялись естественные образцы горных пород в условиях, сходных с натурными, в соответствии с критериями подобия.

Результаты исследования. В соответствии с комплексным подходом на первом этапе исследований выполнен инженерно-геологический и горнотехнический анализ и обоснована геоструктурная типизация территорий Шахтинско-Несветаевского района. В геологическом строении Шахтинской котловины принимают участие отложения горных пород четвертичного, неогенового и каменноугольного возрастов. Четвертичные отложения представлены эолово-делювиальными суглинками, неогеновые отложения представлены скифскими глинами и суглинками. Каменноугольные породы представлены отложениями среднего отдела карбона свитами C_2^5 и C_2^4.

С учетом инженерно-геологических условий Шахтинского угольного района гидроактвизированные территории на полях закрываемых угольных шахт классифицированы в три геоструктурных типа по следующим признакам (таблица 1):

Таблица 1

Типизация гидроактивизированных территорий на полях закрываемых шахт Шахтинского угольного района

№ п/п	Тип гидроактивизированной территории	Глубина уровня грунтовых вод	Мощность покровных отложений	Горные породы, преобладающие в разрезе
1	Тип III	2,0–5,0	20–50	Неогеновые и четвертичные отложения (пески, суглинки, глины)
2	Тип II	0,3–2,0	10–20	Аллювиальные и делювиальные четвертичные отложения (суглинки и глины)
3	Тип I	→0	0–5	Выход трещиноватых пород карбона на поверхность

Для приведенных инженерно-геологических условий в соответствии с принципом дифференциации обоснованы технологические схемы формирования искусственных оснований в типовых условиях подтопленных и подработанных территорий. Для I типа условий изучена схема тампонажа трещиноватых пород в основании фундамента; для II типа обоснована модель процесса тампонажа в режиме гидроразрыва вязкопластичным раствором зоны разуплотненного дисперсного грунта; для III типа разработана новая комбинированная схема формирования основания в дисперсных грунтах и стабилизационной подушки, в контакте с коренными отложениями.

Исходя из вышеизложенного, исследования проводились по двум направлениям: первое — тампонаж вязкопластичным раствором трещиноватых скальных пород на малых глубинах; второе — высоконапорная инъекция растворов в разуплотненные дисперсные породы в сочетании с формированием стабилизационной подушки.

На основании известных теоретических результатов [12] аналитически исследованы параметры тампонажной подушки на контакте покровных и коренных отложений. Для этого была решена теоретическая задача и определены формулы расчета основных параметров стабилизационной подушки: радиусы течения раствора, давление нагнетания, объемы инъекций, количество скважин. Так, общую толщину подушки на контакте коренных и покровных отложений можно вычислить по формуле:

$$D = \frac{a \cdot h(\Delta P - C - \rho \cdot g \cdot h \cdot tg\varphi)}{\beta(1 + e_0)} + \delta_0 \cdot e^{\beta_i(\Delta P + \lambda \cdot \gamma \cdot h \cdot \cos\alpha)},$$

где C — сцепление дисперсных пород, МПа; φ — угол внутреннего трения, град; ρ — плотность пород, кг/м^3; a — сжимаемость дисперсных пород, МПа-1; e_0 — начальный коэффициент пористости пород; β — эмпирический параметр; λ — коэффициент бокового давления; γ — удельный вес горных пород, кг/м^3; α — угол наклона канала течения; δ — раскрытие канала течения, м; β_i — комплексный параметр трещиноватости, Па-1; ΔP — перепад давления в канале, Па.

Анализ распределения раствора при формировании подушки показал, что основное деформирование будут испытывать дисперсные породы, а ее форма близка по параметрам к эллипсоиду.

Эмпирио-аналитическим методом проведены исследования процесса закрепления дисперсных разуплотненных пород. Для стабилизации зоны разуплотнения (деконсолидированных пород) целесообразно инъецировать в нее глиноцементный вязкопластичный раствор в напорном режиме. В дисперсных породах будет происходить фильтрационная консолидация, которая зависит от давления инъекции. Результаты исследований в виде графических зависимостей представлены на рис. 1.

Аналитическими исследованиями обосновано, что при тампонаже трещиноватых массивов глиноцементным раствором модуль общей деформации затампонированных пород увеличивается в 3–10 раза, а породный массив становится устойчивым. Экспериментально доказано, что модуль деформации затампонированного дисперсного породного массива с искусственной трещиноватостью изменяется с 18÷22 МПа до 28÷45 МПа, а модуль осадки составляет 3–7 мм/м.

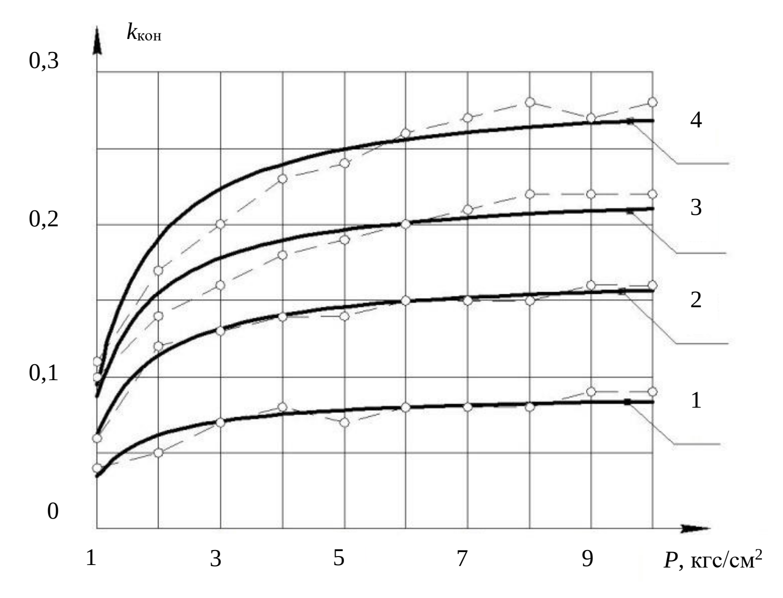


Рис. 1. Зависимость показателя консолидации суглинка от давления нагнетания раствора (начальный коэф. деконсолидации суглинка: 1 — 1,1; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4).

С помощью компьютерного моделирования исследовались вертикальные перемещения системы «основание – фундамент» при инъекционном упрочнении гидроактивизированного грунтового массива методом конечных элементов. В условиях подработанных и обводненных территорий основным фактором критических деформаций строительных конструкций является гидроактивизация грунтового массива по трем характерным типам инженерно-геологических разрезов. В результате выполненного численного моделирования получены грунтовые области подверженные максимальным деформациям со значениями абсолютных перемещений для каждой модели: № 1 — $U_{y\ abs}$ = 0,063 м; № 2 — $U_{y\ abs}$ = 0,053 м; № 3 — $U_{y\ abs}$ = 0,043 м. Закономерности распределения осадок системы «основание – фундамент» для трех моделей представлены на рис. 2.

Для проведения экспериментальных исследований процесса инъекционной консолидации и деформирования разуплотненного грунта в соответствии с критериями подобия была разработана специальная конструкция стенда. Исследования выполнялись на образцах четвертичного суглинка. Был рассмотрен наиболее часто встречаемый ряд суглинков с исходной объемной массой скелета $\gamma_{с.исх}$ = 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8 г/см^3, что позволило построить соответственно шесть зависимостей коэффициента фильтрации от плотности скелета грунта $К_ф = f(\gamma с)$ и установить закономерности деформирования затампонированных суглинков. Консолидация суглинков выполнялась нагнетанием глиноцементного раствора под давлением 0,3–0,5 МПа.

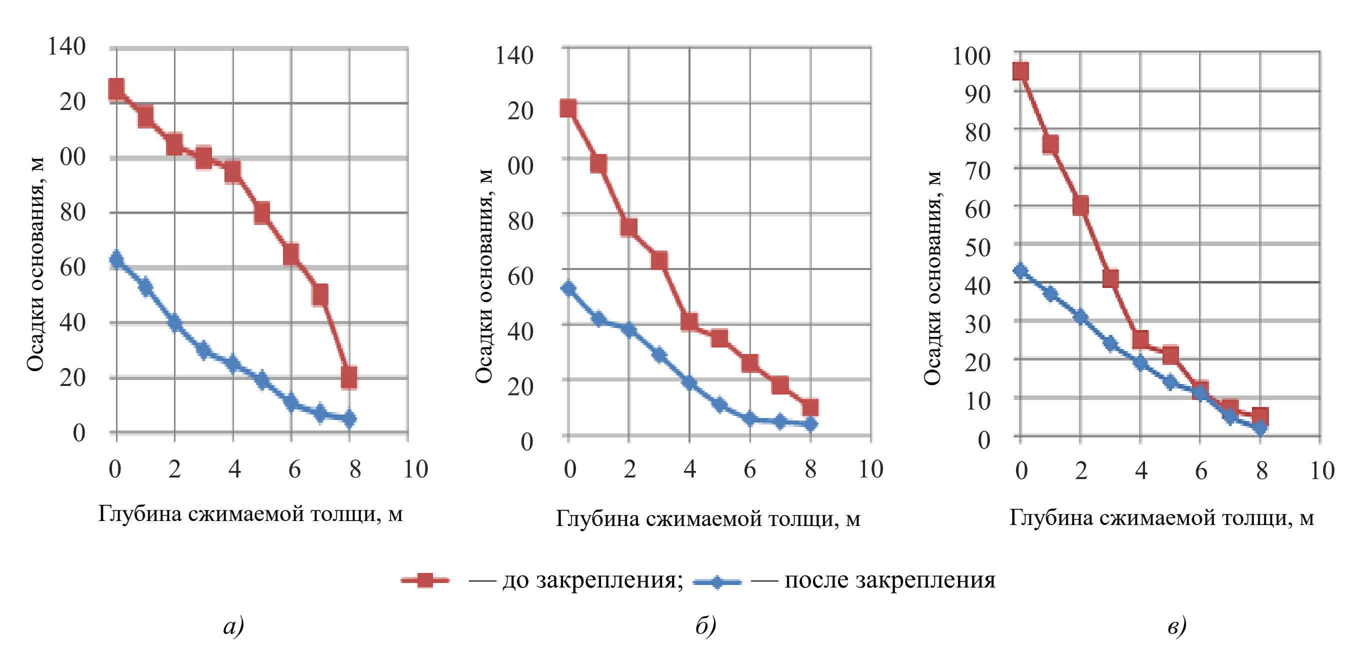


Рис. 2. Закономерности распределения осадок фундамента до и после формирования искусственного основания:
а — в разуплотненном суглинке; *б* — в системе трещин; *в* — на контакте покровных и коренных пород

Анализ результатов исследований позволил сделать выводы о том, что уменьшение объемной массы скелета суглинка на 0,3–0,4 г/см^3 приводит к увеличению коэффициента фильтрации в 10 раз. При этом деформируемость суглинков в зависимости от влажности увеличивается в 17–21 раз [11]. На основании результатов стендовых исследований были определены величины и построена диаграмма распределения приращений объемной массы скелета грунта для обеспечения его водонепроницаемости и устойчивости при фильтрационной консолидации (рис. 3).

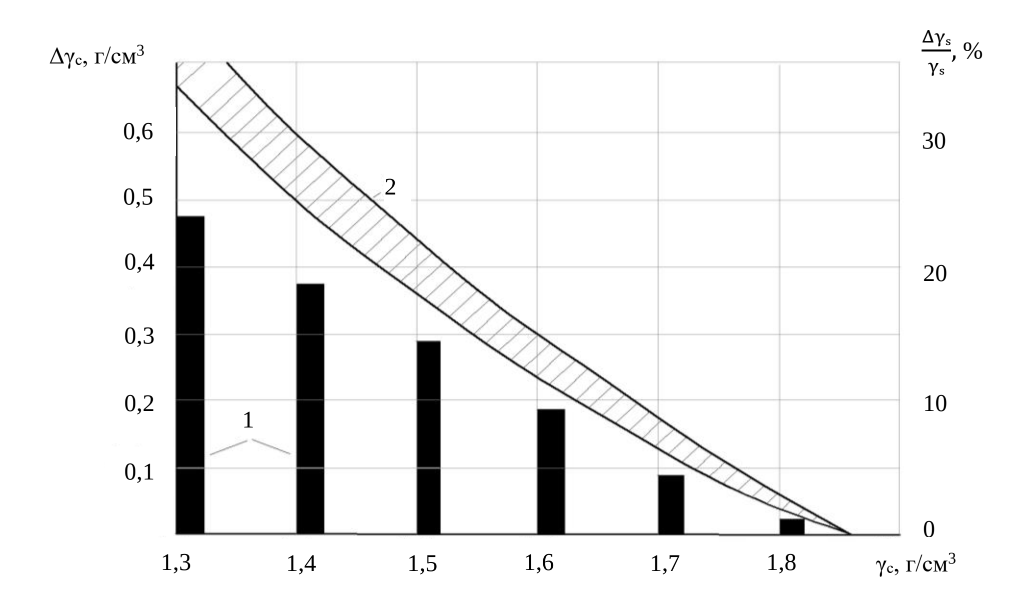


Рис. 3. Распределение абсолютного (1) и относительного (2) прироста объемной массы скелета грунта при его консолидации

Важным этапом исследований было проведение натурных испытаний технологии тампонажа гидроактивизированных грунтов. Для этого по усовершенствованной методике были рассчитаны технологические параметры напорной цементации обводненных разуплотненных глинистых пород, а также была разработана технологическая схема реконструкции основания для аварийного здания Дворца культуры в г. Шахты.

После анализа результатов инженерно-геологических изысканий и результатов обследования здания Дворца культуры, был выполнен сбор нагрузок и проведены расчеты напряжений под фундаментами, которые составили 0,30–0,33 МПа. При этом лабораторными испытаниями деформационно-прочностных свойств пород было обосновано, что длительная прочность обводненного грунта основания (просадочные суглинки) не превышает 0,24–0,26 МПа, а основой причиной деформирования здания является замачивание суглинков. Следовательно, по расчетам необходимая прочность грунтов искусственного основания должна составлять 0,36–0,39 МПа по всей глубине сжимаемой толщи.

С целью упрочнения грунтов основания фундаментов предложено выполнить их тампонаж на глубину 8,0 м в напорном режиме по буро-инъекционной технологии с использованием вязкопластичных растворов. Данный метод позволяет создать армирующий цементный каркас, уплотнить и гидроизолировать грунт [13]. В зависимости от свойств грунтов радиус напорной цементации достигает 1,0–1,2 м.

На основании аналитических и экспериментальных исследований нами была получена формула для расчета прочности закрепления грунта в зависимости от закачанного объема цементного раствора [14]:

$$\tau = 1,5\tau_0\left(1+\frac{kV_{ц}}{(1-n_0)V}\right) = 1,5\left(C_0+\sigma_н \operatorname{tg}\phi_0\right)\left(1+\frac{kV_ц}{(1-n_0)V}\right),$$

где τ_0 – исходная сдвиговая прочность грунта МПа; k — выход цементного камня; $V_ц$ — объем цементного раствора, м^3; n_0 — начальная пористость грунта; V — объем инъектируемого грунта, м^3.

Расчет сдвиговой прочности затампонированных грунтов по формуле дал значение 0,39 МПа. Для экспериментальной проверки приведенной эмпирио-аналитической формулы и уточнения технологических параметров инъекции грунтов на участке реконструкции здания Дворца культуры был организован опытный участок. На участке были пробурены пять экспериментальных скважин, в которые установили инъекторы диаметром 100 мм на глубину 8,0 м. В грунт под давлением до 0,5 МПа инъектировали цементно-силикатный раствор плотностью 1,8 г/см^3. После тампонажа грунтов выполнялись контрольное бурение с отбором керна и исследования прочности грунтов на сдвиг.

Сравнение результатов испытаний грунта на прочность выполнялось для сходственных инженерно-геологических условий (глубина 3,5 м; 6,5 м и 8,0 м) (таблица 2).

Таблица 2

Сдвиговая прочность заинъектированных грунтов

Грунт	Глубина, м	Сдвиговая прочность грунта, МПа, по скважинам				
		1	2	3	4	5
Суглинок	3,5	0,43	0,44	0,40	0,44	0,46
Глина	6,5	0,36	0,36	0,33	0,36	0,38
Глина	8,0	0,38	0,36	0,36	0,37	0,36

Обсуждение и заключение. Анализ полученных натурных результатов исследования свойств затампонированных грунтов показывает, что с погрешностью не более 12 % возможно на стадии проектирования оценить качество упрочнения грунта по расходу цемента. Также установлено, что закрепленные грунты на всех глубинах при замачивании просадочностью не обладают и могут работать как основание фундамента.

В результате комплексных научно-исследовательских работ получены основные результаты и выводы.

1. Инженерно-геологические условия эксплуатации оснований фундаментов на подработанных и гидроактивизированных территориях представлены тремя геоструктурным типами, что позволяет дифференцированно формировать искусственные основания фундаментов в дисперсных разуплотненных и скальных трещиноватых грунтах путем напорной инъекции вязкопластичных растворов.

2. В разуплотненных дисперсных грунтах инъекция вязкопластичных растворов в режиме гидрорасчленения при давлениях не более 1 МПа позволяет достигать показателя консолидации 0,26, увеличения модуля общей деформации до 28–45 МПа, прочности до 0,4 Мпа и водонепроницаемости при плотности скелета грунта 1,9 г/см^3, что обеспечивает снижение осадок фундаментов в 2–2,5 раза.

3. Инъектирование скальных трещиноватых грунтов глиноцементным раствором увеличивает модуль общей деформации затампонированных пород в 3–10 раз, что обеспечивает снижение осадок фундамента в 2,2 раза, а постановка вязкопластичной стабилизационной подушки на контакте с покровными отложениями обеспечивает дополнительную консолидацию и гидроизоляцию дисперсных грунтов, что стабилизирует деформации фундаментов.

Список литературы

1. Должиков, П.Н., Прокопов А.Ю. *Геодинамические процессы в гидроактивизированных подработанных горных массивах*. Монография. Ростов-на-Дону: РГСУ; 2015. 149 с. URL: https://ntb.donstu.ru/content/geodinamicheskie-processy-v-gidroaktivizirovannyh-podrabotannyh-gornyh-massivah (дата обращения: 22.08.2023).

2. Бондаренко О.В., Кочергин В.И., Кураков Ю.И., Ляшенко Ю.М., Мартыненко И.А., Масленников С.А. и др. *Проблемы развития горнодобывающего комплекса Восточного Донбасса и пути их решения.* Монография. Страданченко С.Г. (ред.). Новочеркасск: Лик; 2009. 198 с. URL: https://www.geokniga.org/books/16276 (дата обращения: 25.08.2023).

3. Dolzhikov P., Semiriagin S. Investigation and Technical Decisions of the Mining and Ecological Problems while Closing Coal Mining. In: *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane and Ores Mining.* Leiden, Netherlandes: CRS Press/Balkema; 2014. P. 147–151. URL: https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17547-27/investigations-technical-decisions-mining-ecological-problems-closing-coal-mines-dolzhikov-semiriagin (дата обращения: 20.08.2023).

4. Должиков П.Н., Пронский Д.В., Легостаев С.О. *Тампонажно-закладочные работы в регионах закрытия шахт.* Монография. Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-Принт»; 2020. 290 с.

5. Belodedov A.A., Dolzhikov P.N., Legostaev S.O. Research into Dangerous Surface Deformations over Inclined Shafts of Abandoned Coal-Mines. In: *Scientific Reports on Resource Issues. Vol. 1.* Freiberg, Germany: TU Bergakademie; 2016. P. 159–165.

6. Должиков П.Н., Легостаев С.О., Талалаева В.М. Анализ гидроактивизации массива горных пород при подтоплении Шахтинского угольного района. В: *Сб. матер. 14-й межд. научн.-техн. конф. «Перспективы развития строительных технологий».* Днепр: НТУ «ДП»; 2020. С. 16–21. URL: https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/155402 (дата обращения: 24.08.2023).

7. Herion S., Fleischer O., Ernst R., Bruns C. Numerical Investigations on the Deformation Behavior of Horizontal Loaded Injection Piles. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth International Ocean and Polar Engineering Conference of the International Society of Offshore and Polar Engineers.* Kona, USA; 2015. P. 79–83. URL: https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE15/All-ISOPE15/ISOPE-I-15-637/14956 (дата обращения: 21.08.2023).

8. Исаев Б.И., Бадеев С.Ю., Цапкова Н.Н. *Инъекция грунтов при возведении фундаментов, подготовка оснований и охрана окружающей среды*. Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования; 2014. 513 с.

9. Прокопов А.Ю., Должиков П.Н., Талалаева В.М. *Стабилизация деформаций земной поверхности при закрытии шахт.* Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-принт»; 2020. 196 с.

10. Должиков, П.Н., Збицкая В.В. *Буро-инъекционная технология упрочнения оснований фундаментов.* Монография. Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-принт»; 2019. 174 с.

11. Benoot J., Dewaele L., Provoost N., Kindt P., Atalar C. Analysis of installation factors of screwed tube piles with grout injection. Atalar C. (Editor). In: *Proceedings of the Fourth International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*; 2016;1(1):225–230. URL: https://clck.ru/35hDyo (дата обращения: 28.08.2023).

12. Кипко Э.Я., Должников П.Н., Дудля Н.А., Кипко А.Э., Лушникова О.Ю., Попов А.В. и др. *Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт*. 2-е изд., перераб. и доп. Днепропетровск: Национальный горный ун-т; 2004. 367 с.

13. Должиков П.Н., Акопян А.Ф., Акопян В.Ф. Исследование деформационно-прочностных свойств грунтов, армированных буро-инъекционными сваями. *Известия ТулГУ. Науки о Земле.* 2019;(4):221–228. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-deformatsionno-prochnostnyh-svoystv-gruntov-armirovannyh-buro-inektsionnymi-svayami (дата обращения: 24.08.2023).

14. Должиков, П.Н., Легостаев С.О., Сычев И.В. Реконструкция фундамента и основания аварийного здания на подработанной гидроактивизированной территории. *Известия ТулГУ. Науки о Земле.* 2022;(1):241–250. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-fundamenta-i-osnovaniya-avariynogo-zdaniya-na-podrabotannoy-gidroaktivizirovannoy-territorii (дата обращения: 25.08.2023).

References

1. Dolzhikov PN, Prokopov AY. *Geodinamicheskie Protsessy v Gidroaktivizirovannykh Podrabotannykh Gornykh Massivakh*. Monograph. Rostov-on-Don: RGSU Publ.; 2015. 149 p. (In Russ.) URL: https://ntb.donstu.ru/content/geo-dinamicheskie-processy-v-gidroaktivizirovannyh-podrabotannyh-gornyh-massivah (accessed: 22.08.2023).

2. Bondarenko OV, Kochergin VI, Kurakov YI, Lyashenko YM, Martynenko IA, Maslennikov SA, et al. *Problemy razvitiya gornodobyvayushchego kompleksa Vostochnogo Donbassa i puti ikh resheniya*. Monograph. Stradanchenko (Editor). Novocherkassk: Lik Publ.; 2009. 198 p. (In Russ.) URL: https://www.geokniga.org/books/16276 (accessed: 25.08.2023).

3. Dolzhikov P, Semiriagin S. Investigation and Technical Decisions of the Mining and Ecological Problems while Closing Coal Mining. In: *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane and Ores Mining*. Leiden, Netherlandes: CRS Press/Balkema; 2014. P. 147–151. URL: https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17547-27/investigations-technical-decisions-mining-ecological-problems-closing-coal-mines-dolzhikov-semiriagin (accessed: 20.08.2023).

4. Dolzhikov PN, Pronskii DV, Legostaev SO. *Tamponazhno-zakladochnye raboty v regionakh zakrytiya shakht*. Monograph. Rostov-on-Don: DSTU-Print, LLC; 2020. 290 p. (In Russ.)

5. Belodedov AA, Dolzhikov PN, Legostaev SO. Research into Dangerous Surface Deformations over Inclined Shafts of Abandoned Coal-Mines. In: *Scientific Reports on Resource Issues*. *Vol. 1*. Freiberg, Germany: TU Bergakademie; 2016. P. 159–165.

6. Dolzhikov PN, Legostaev SO, Talalaeva VM. Analiz Gidroaktivizatsii Massiva Gornykh Porod Pri Podtoplenii Shakhtinskogo Ugol'nogo Raiona. In: *Proceedings of the 14th International Scientific and Engineering Conference "Perspectives of Construction Industry Development"*. Dnepr: National Technical University "Dniprovska Polytechnic"; 2020. P. 16-21. (In Russ.) URL: https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/155402 (accessed: 24.08.2023).

7. Herion S, Fleischer O, Ernst R, Bruns C. Numerical Investigations on the Deformation Behavior of Horizontal Loaded Injection Piles. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth International Ocean and Polar Engineering Conference of the International Society of Offshore and Polar Engineers*. Kona, USA; 2015. P. 79–83. URL: https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE15/All-ISOPE15/ISOPE-I-15-637/14956 (accessed: 21.08.2023).

8. Isaev BI, Badeev SY, Tsapkova NN. *In`ektiya Gruntov Pri Vozvedenii Fundamentov, Podgotovka Osnovanii i Okhrana Okruzhayushchei Sred*y. Rostov-on-Don: Science and Education Foundation; 2014. 513 p. (In Russ.)

9. Prokopov AY, Dolzhikov PN, Talalaeva VM. *Stabilizatsiya Deformatsii Zemnoi Poverkhnosti Pri Zakrytii Shakht*. Rostov-on-Don: DSTU-Print, LLC; 2020. 196 p. (In Russ.)

10. Dolzhikov PN., Zbitskaya VV. Buro-In`ektsionnaya Tekhnologiya Uprochneniya Osnovanii Fundamentov : *Monograph*. Rostov-on-Don: DSTU-Print, LLC, 2019. 174 p. (In Russ.)

11. Benoot J, Dewaele L, Provoost N, Kindt P, Atalar C. Analysis of installation factors of screwed tube piles with grout injection. Atalar C. (Editor). In: *Proceedings of the Fourth International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*; 2016;1(1):225–230. URL: https://clck.ru/35hDyo (accessed: 28.08.2023).

12. Kipko EY, Dolzhikov PN, Dudlya NA, Kipko AE, et al. Kompleksnyi Metod Tamponazha pri Stroitel'stve Shakht. 2nd edition reworked and supplemented. Dnepropetrovsk: National Technical University; 2004. 367 p. (In Russ.)

13. Dolzhikov PN, Akopyan AF, Akopyan VF. Issledovanie Deformatsionno-Prochnostnykh Svoistv Gruntov, Armirovannykh Buro-In'ektsionnymi Svayami. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*. 2019;(4):221–228. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-deformatsionno-prochnostnyh-svoystv-gruntov-armirovannyh-buro-inektsionnymi-svayami (accessed: 24.08.2023).

14. Dolzhikov PN, Legostaev SO, Sychev IV. Rekonstruktsiya fundamenta i osnovaniya avariinogo zdaniya na podrabotannoi gidroakti-vizirovannoi territorii. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*. 2022;(1):241-250. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-fundamenta-i-osnovaniya-avariynogo-zdaniya-na-podrabotannoy-gidroaktivizirovannoy-territorii (accessed: 25.08.2023).

Поступила в редакцию 27.08.2023
Поступила после рецензирования 06.09.2023
Принята к публикации 19.09.2023

Об авторах:

Должиков Петр Николаевич, профессор кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, dolpn@yandex.ru.

Талалаева Виктория Михайловна, ассистент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, victory88t@gmail.com.

Заявленный вклад авторов:
П.Н. Должиков — горно-технический анализ, компьютерное моделирование, участие в натурных исследованиях, анализ результатов и руководство исследованиями;
В.М. Талалаева — инженерно-геологический анализ, аналитические и экспериментальные исследования, участие в натурных исследованиях, оформление результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 27.08.2023
Revised 06.09.2023
Accepted 19.09.2023

About the Authors:
Petr N. Dolzhikov, Dr.Sci.(Engineering), Professor of the Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, dolpn@yandex.ru
Viktoria M. Talalaeva, Assistant of the Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, victory88t@gmail.com

Claimed contributorship:
PN Dolzhikov — mining-engineering analysis, computer modeling, participation in field studies, research results analysis and research supervision;
VM Talalaeva — geotechnical analysis, analytical and experimental studies, participation in field studies, research results description.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.